

УДК 622. 831. 24: 622. 268. 12

УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ ПОДВИГАНИЯ ЛАВ

д.т.н. Кольчик Е.И. (ИФГП НАНУ)

Наведені результати шахтних досліджень за конвергенцією порід у гірничих виробках. Розглянуто питання впливу порушеності вугільних пластів на конвергенцію порід.

STABILITY OF EXCAVING MINeworks AT THE LONGWALLS HIGH SPEED MOVING

Kolchik E.I.

The results of observation of extractive workings rocks convergence are show. The question of the influence of coal layers disturbance on convergence of rocks.

До настоящего времени обеспечение устойчивости горных выработок является одной из главных проблем при подземной разработке угольных пластов. Выход из строя той или иной выработки может привести к значительному снижению объемов добычи угля и увеличению депрессии вентиляционной струи.

Основной причиной снижения устойчивости горных выработок является напряженное состояние горного массива, которое с ростом глубины работ увеличивается. С ростом глубины работ увеличивается также газоносность угольных пластов, что требует увеличения количества подаваемого в шахту воздуха. Для обеспечения регламентируемых Правилами безопасности скоростей движения воздуха возникла необходимость увеличения площади поперечного сечения горных выработок.

Так, в 1917 году в Донбассе средняя глубина стволов была равна 104 м при поперечном сечении $6,9 \text{ м}^2$ [1]. В 1940 г. средняя глубина стволов увеличилась до 210 м при сечении $14,0 \text{ м}^2$, а за период с 1966 по 1970 гг. – до 511 м с поперечным сечением 33 м^2 . В настоящее время глубина стволов на шахтах Украины значительно больше, поскольку было построено и сдано в эксплуатацию ряд шахт с глубиной стволов более 1000 м.

К увеличению поперечных размеров выработок приводит также и рост производственной мощности шахт. Поскольку с увеличением добычи угля на шахте увеличивается количество очистных и подготовительных забоев, то, следовательно, увеличивается и расход воздуха необходимый для проветривания шахты. Для обеспечения регламентированных правилами безопасности скоростей движения воздуха необходимо увеличивать площадь поперечного сечения выработок. Однако с увеличением поперечных размеров горных выработок происходит снижение их устойчивости.

В особо сложных условиях находятся выемочные выработки, которые в зависимости от применяемой системы разработки могут поддерживаться в массиве, в зоне временного опорного давления, в зоне интенсивного смещения пород и в зоне установившегося горного давления. Поддержание горных выработок в рабочем состоянии весьма трудоемкий процесс. Так, средняя трудоемкость поддержания горных выработок в Донбассе превышает 70 чел.-смен на 1000 т добываемого угля [2].

Большое влияние на устойчивость выработок в зоне влияния очистных работ оказывает скорость подвигания лавы. С увеличением скорости подвигания лавы увеличивается протяженность зависающей породной консоли, что приводит к возрастанию давления на крепь выработки в зоне временного опорного давления и в зоне интенсивного смещения пород. При этом, с увеличением длины консоли происходит увеличение протяженности зоны временного опорного давления и зоны интенсивного смещения пород [3], которые могут быть определены по формуле

$$L = A + BL_k, \text{ м}, \quad (1)$$

где L – протяженность зоны временного опорного давления или зоны интенсивного смещения пород, м; A – коэффициент, равный 22 и 4 для зоны опорного давления и зоны интенсивного смещения пород соответственно; B – коэффициент, равный 1,8 и 1,46 для зоны опорного давления и для зоны интенсивного смещения пород, соответственно; L_k – длины зависающей консоли песчаника, м.

Длина зависающей породной консоли зависит от скорости подвигания лавы и комплекса горно-геологических факторов [4]. Она описывается уравнением

$$L_k = 18 + 0,007 \frac{V_{\text{л}} M K_{\text{уст}} \sigma H}{m \sigma_y}, \text{ м}, \quad (2)$$

где $V_{\text{л}}$ – скорость подвигания лавы, м/сут; M – толщина наиболее мощного породного слоя в породах основной кровли, м; $K_{\text{уст}}$ – коэффициент, учитывающий продолжительность устойчивого состояния подработанного горного массива, м/сут. Он определяется из выражения $K_{\text{уст}} = t/h_{\text{св}}$; σ – предел прочности на одноосное сжатие наиболее мощного слоя основной кровли, МПа; t – продолжительность развития сдвижения горного массива по направлению движения лавы после ее отхода от разрезной печи на расстояние более $1,5l_{\text{л}}$, сут.; $h_{\text{св}}$ – высота свода сдвижения горного массива, м. При раскрытии свода его высота принимается равной глубине работ (H); m – мощность разрабатываемого пласта, м; σ_y – предел прочности угля на одноосное сжатие, МПа.

Смещения пород в горных выработках происходят за счет образования вокруг нее разгруженной зоны и ее составной части – зоны неупругих деформаций [5–8].

В результате выполненных в ИФГП НАН Украины исследований установлено, что протяженность разгруженной зоны (при поддержании выработки в массиве на протяжении 1–2 лет) существенно зависит от прочности пород, вмещающих горную выработку. Однако при одной и той же прочности пород, но при различной глубине заложения выработки размер разгруженной зоны вокруг нее различен. С увеличением глубины протяженность разгруженной зоны так же увеличивается. Для оценки параметров разгруженной зоны необходимо учитывать относительную прочность горных пород на данной глубине. С изменением величины отношения предела прочности пород на одноосное сжатие к напряжениям нетронутого массива с 0,5 до 5,0 (т.е. в 10 раз) протяженность разгруженной зоны уменьшается с 4,1 до 1,75 м (в 2,4 раза).

С течением времени, в пределах разгруженной зоны (со стороны контура выработки) появляется зона неупругих деформаций. Наличие зоны неупругих деформаций и ее протяженность зависят от прочности пород и времени поддержания выработки. Зона неупругих деформаций образуется в результате разгрузки и разрушения горных пород или угольного пласта. Разрушение горных пород в массиве возможно при соотношении $\sigma_0 < \sigma$ (σ_0 – сопротивление пород на отрыв в конкретной точке массива, МПа; σ – величина напряжений в той же точке, МПа) С увеличением расстояния от выработки в сторону массива происходит увеличение составляющих тензора напряжений. С ростом величины напряжений σ_1 ; σ_2 ; σ_3 (где σ_1 ; σ_2 ; σ_3 – составные тензора главных напряжений) происходит рост величины сопротивления пород на отрыв.

Предельное сопротивление горных пород на разрыв может быть определено по формуле [9]

$$\sigma_0 = \sigma_1 + \frac{\sigma_p(|\sigma_2| + |\sigma_3|)}{\sigma_{сж}}, \quad (3)$$

где σ_p – сопротивление пород на одноосное растяжение, МПа; $\sigma_{сж}$ – сопротивление пород на одноосное сжатие, МПа.

Выполненные исследования показали, что величина предельного сопротивления пород на отрыв зависит не только от протяженности разгруженной зоны, и величины напряжений, но и от прочности пород. Данная зависимость описывается уравнением

$$\sigma_0 = N\sigma_{сж} (0,001 + 0,021L^{0,8}). \quad (4)$$

где N – величина напряжений на данной глубине, МПа.

При малых значениях прочности горных пород $\sigma_0 < \sigma_1$, последние разрушаются, и в результате этого образуется зона неупругих деформаций.

Область начала разрушения пород в разгруженной зоне можно определить по точкам (3) пересечения кривых изменения прочности на отрыв (2) с кривой (1) изменения величины напряжений в пределах разгруженной зоны

(рис. 1). Из рис. 1 видно, что при относительной прочности пород на одноосное сжатие более $5,1N$ зона неупругих деформаций при монолитных и ненарушенных породах не образуется. С уменьшением прочности пород ($\sigma_{сж} < 5,1N$) появляется зона неупругих деформаций, длина которой изменяется от $0,27$ до $0,96 C$.

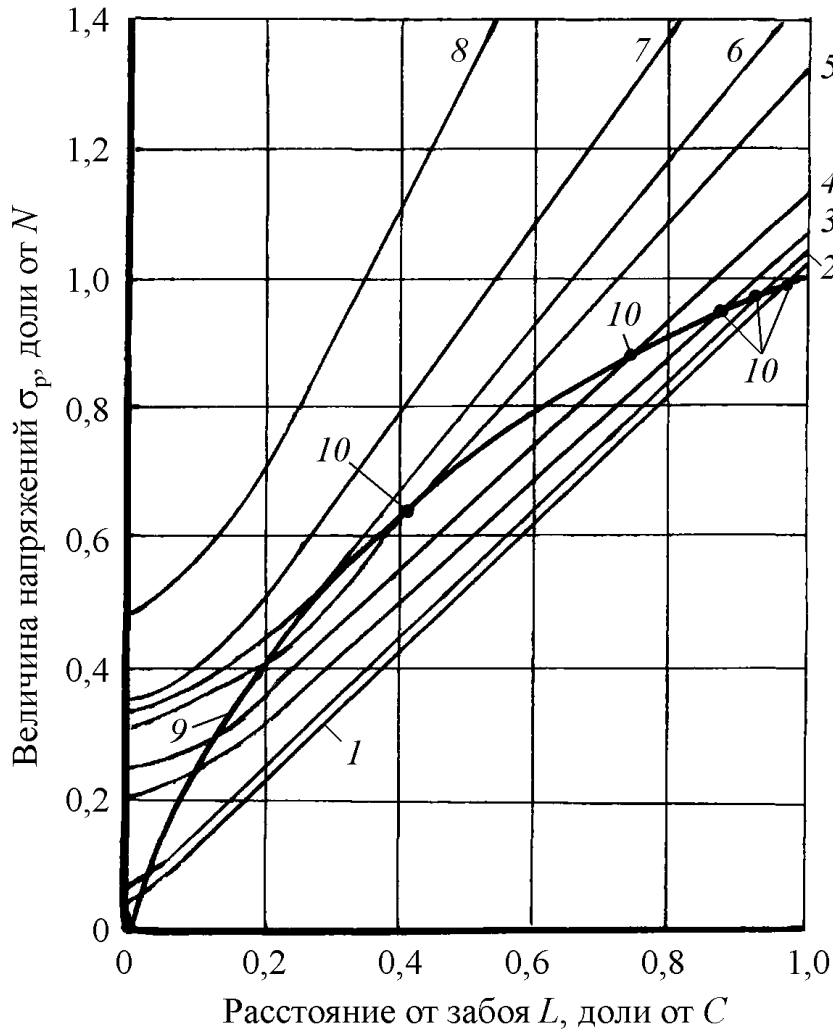


Рис. 1. Изменение прочности пород на отрыв от расстояния до забоя в пределах разгруженной зоны: 1–8 — изменение величины напряжений в пределах разгруженной зоны ($1 - \sigma_{сж}/N = 0,5$; 2 — 1,0; 3 — 2,5; 4 — 3,5; 5 — 4,5; 6 — 5,1; 7 — 5,5; 8 — 7,0), 9 — изменение прочности пород на отрыв, 10 — точки начала разрушения пород

Зависимость изменения протяженности зоны неупругих деформаций от отношения прочности пород на одноосное сжатие к величине напряжений нетронутого массива и протяженности разгруженной зоны описывается уравнением [5].

$$l_{з.н.д} = [1 - 0,01(\sigma_{сж}/N)^{2,8}]C, \text{ м}, \quad (5)$$

где $l_{з.н.д}$ — протяженность зоны неупругих деформаций, м.

Разрушенные в зоне неупругих деформаций породы, увеличиваясь в объеме, смещаются в выработку, что приводит к уменьшению ее сечения. Наибольшие размеры зона неупругих деформаций приобретает при прочности пород менее 40 МПа, когда $\sigma_{сж}/N < 2$. При этом зона неупругих деформаций составляет 93–99 % от протяженности разгруженной зоны.

Протяженность разгруженной зоны у выработки зависит от условий ее поддержания.

Максимальный размер разгруженной зоны у выемочной выработки, которая поддерживается повторно, будет равен

$$C = 0,5t^{0,7} + 0,008 \cdot L_{о.д.} + 0,17L_{и} + 0,006L_{о.д.2} + 0,4t_y^{0,5} - 5,37, \text{ м}, \quad (6)$$

где C – протяженность разгруженной зоны, м; t – время поддержания выработки в массиве, мес.; $L_{о.д.}$ – протяженность зоны временного опорного давления при отработке первой лавы, м; $L_{и}$ – протяженность зоны интенсивного смещения пород, м; $L_{о.д.2}$ – протяженность зоны временного опорного давления при отработке второй лавы, м; t_y – время поддержания выработки в зоне установившегося горного давления, мес.

Доказано, что устойчивость выемочных выработок существенно зависит от скорости подвигания очистного забоя и наличия мощных породных слоев в кровле разрабатываемого пласта [10, 11]. Зависимость изменения величины полной конвергенции пород за время поддержания в зоне влияния очистного забоя описывается уравнением

$$U = D + BV_{л}, \text{ см}, \quad (7)$$

где U – величина конвергенции пород, см; D – коэффициент, равный соответственно: 84 – для пород кровли с почвой в зоне интенсивного смещения пород; 45 и 33 – для пород кровли с почвой в зоне опорного давления при поддержании в массиве и в присечной выработке; 21 и 16 – для пород боков в зоне опорного давления при поддержании в массиве и в присечной выработке; B – коэффициент, равный: 8,2 – для пород кровли с почвой в зоне интенсивного смещения пород; 5,4 и 3,9 – для пород кровли с почвой в зоне опорного давления соответственно поддерживаемой в массиве и присечной выработке; 2,9 и 2,4 – для боков выработки в зоне опорного давления соответственно поддерживаемой в массиве и присечной выработке; $V_{л}$ – скорость подвигания лавы, м/сут.

Отклонение расчетных значений полной конвергенции пород за время поддержания выемочных выработок в зоне влияния очистных работ от фактических не превышает 15 %, что свидетельствует о достаточной сходимости расчетов и экспериментальных данных. При этом коэффициент корреляции равен 0,82–0,87, что свидетельствует о тесной связи между исследуемыми факторами.

В общем, величина смещений пород зависит от протяженности зоны неупругих деформаций и относительной прочности вмещающих выработку

пород. При этом величина смещений пород может быть определена по формулам

$$U_k = (83 - 20\sigma_{сж}/N)l_{з.н.д.}, \text{ см}; \quad (8)$$

$$U_{п} = (71 - 17\sigma_{сж}/N)l_{з.н.д.}, \text{ см}; \quad (9)$$

$$U_{б} = (35 - 8\sigma_{сж}/N)l_{з.н.д.}, \text{ см}, \quad (10)$$

где U_k ; $U_{п}$; $U_{б}$ – величина смещений пород кровли, почвы и боков соответственно, см.

Опыт работы передовых шахт показал, что для обеспечения высокопроизводительной работы очистных забоев необходимо увеличивать скорость подвигания лав. Влиянию скорости подвигания очистных забоев на устойчивость выемочных выработок посвящено много работ. Однако исследований при скоростях подвигания очистных забоев более 5 м/сутки довольно мало.

В результате выполненных исследований установлено, что при наличии в кровле разрабатываемого пласта мощного монолитного песчаника изменение скорости подвигания очистного забоя с 1,07 до 7,0 м/сут. приводит к увеличению скорости уменьшения высоты штрека на расстоянии 20 м от лавы с 1,1 до 6,6 см/сут.

Кроме скорости подвигания лавы на скорость уменьшения высоты штрека оказывает влияние и расстояние до очистного забоя. Выполненные исследования показали, что в условиях шахты «Красноармейская-Западная № 1» зависимость изменения скорости уменьшения высоты выемочного штрека в зоне опорного давления от скорости подвигания лавы и расстояния до нее описывается уравнением [11]

$$V_{м} = 14,7V_{л}L^{-0,86}, \quad (11)$$

где $V_{м}$ – скорость уменьшения высоты штрека, который поддерживается в массиве, см/сут.; $V_{л}$ – скорость подвигания очистного забоя, м/сут. ($V_{л} = 1,07-7,0$ м/сут.); L – расстояние до лавы в пределах зоны опорного давления, м.

В случае присечной выработки скорость уменьшения ее высоты в зоне опорного давления описывается уравнением

$$V_{пр} = 10V_{л}L^{-0,86}, \quad (12)$$

где $V_{пр}$ – скорость уменьшения высоты присечной выработки, см/сут.

Отклонение расчетных значений скорости уменьшения высоты штрека от фактической не превышает 25 %, что свидетельствует о надежности вычислений скорости уменьшения высоты штрека.

Впереди зоны опорного давления скорость конвергенции пород кровли и почвы не зависит от скорости подвигания лавы и равна $V_{м} = 0,2$ см/сут. и $V_{пр} = 0,12$ см/сут.

Возрастание скорости подвигания очистного забоя оказывает влияние не только на смещения пород в выемочных выработках, а и на величину газо-

выделения в пределах выемочного участка [6]. Так, с изменением скорости подвигания лавы с 0,5 до 3,0 м/сут. происходит увеличение абсолютного газовыделения из разрабатываемого пласта и выработанного пространства в 1,5 раза. В связи с этим при столбовой системе разработки достичь высоких нагрузок на лаву из-за большого газовыделения не представляется возможным. Для повышения нагрузки необходимо применять комбинированные системы разработки, предусматривающие прямоочное проветривание с выдачей исходящей струи на выработанное пространство по выработке, поддерживаемой за лавой в выработанном пространстве или на контакте с выработанным пространством.

Скорость подвигания лавы практически не оказывает влияния на скорость смещения пород при поддержании выемочных выработок в зоне установившегося горного давления. В таких условиях скорость смещения пород кровли и почвы постоянна и составляет $V_{у.г.д.} = 0,15$ см/сут. (где $V_{у.г.д.}$ – скорость смещения пород кровли и почвы в зоне установившегося горного давления на контакте с выработанным пространством, см/сут.).

На основании выполненных исследований установлено, что при наличии в кровле пласта мощного песчаника в зоне интенсивного смещения пород скорость конвергенции зависит от расстояния до лавы и скорости ее подвигания.

Эта зависимость описывается уравнением

$$V_{и.с} = 14V_{л}L_{п.с}^{-0,7}, \quad (13)$$

где $V_{и.с}$ – скорость суммарных смещений пород кровли и почвы в зоне интенсивного смещения пород, см/сут.; $L_{п.с}$ – расстояние до лавы в пределах зоны интенсивного смещения пород, м.

Отклонение расчетных значений величины суммарной скорости смещения пород кровли и почвы от фактической не превышает 22 %, что свидетельствует о достаточной надежности вычислений.

Практически все шахтопласты Донбасса подвержены дизъюнктивной нарушенности. Крупные геологические нарушения известны и легко прогнозируемы при ведении горных работ. Кроме крупных геологических нарушений в пределах шахтных полей имеется большое количество мелкоамплитудных нарушений, которые оказывают существенное влияние на устойчивость выработок [12–14].

Наличие мелкоамплитудных дизъюнктивных нарушений негативно сказывается на состоянии выемочных выработок и в зоне влияния очистных работ. Так, высота выемочных выработок на сопряжении с лавой у нарушений на 0,4–0,7 м меньше, чем на участках, расположенных до и после этих нарушений.

Наименьшее влияние нарушений наблюдаются при поддержании выработки на контакте с выработанным пространством в зоне установившегося горного давления.

Протяженность зоны влияния мелкоамплитудного дизъюнктивного нарушения по почве выработки описывается уравнением

$$L_{\text{п}} = \frac{A}{(0,0017\beta - 0,017)}, \text{ м}, \quad (14)$$

где A – амплитуда смещения пласта, м; β – угол пересечения выработкой плоскости сместителя нарушения, градус.

Выполненными исследованиями установлено, что протяженность зоны влияния мелкоамплитудного дизъюнктивного нарушения по кровле и по бокам выработки могут быть определены по формулам:

– по кровле выработки

$$L_{\text{к}} = 2 L_{\text{п}}, \text{ м}, \quad (15)$$

– по бокам выработки

$$L_{\text{б}} = 3 L_{\text{п}}, \text{ м}, \quad (16)$$

где $L_{\text{к}}$; $L_{\text{б}}$ – протяженность зоны влияния нарушения по кровле и бокам выработки соответственно, м.

Одним из основных факторов, влияющих на конвергенцию пород, являются условия поддержания выработок (табл. 1).

Таблица 1

Изменение конвергенции пород от условий поддержания выработки

Условия поддержания выработки	Средняя величина конвергенции пород, см	
	кровли с почвой	боков выработки
В массиве	70	32
В массиве в зоне опорного давления	72	36
В зоне интенсивного смещения пород	125	61
В зоне установившегося горного давления	53	28
Присечная выработка до зоны опорного давления	42	21
Присечная выработка в зоне опорного давления	54	29

В пределах зоны влияния нарушения (табл. 2) величина конвергенции пород кровли с почвой на 22 – 55 см больше, чем при поддержании выработки вне зоны влияния нарушения. Величина конвергенции пород боков выработки изменяется от 21 до 61 см, а в зоне влияния нарушения – от 30 до 83 см (см. табл. 2).

В ИФГП НАН Украины разработан способ снижения вредного влияния геологических нарушений на устойчивость выработок [15]. Данный способ заключается в том, что по периметру выработки в зоне разрушенных пород создается упрочненное кольцо и упрочненные полосы, разбивающие массив на клинья. При этом разрушенные породы заклиниваются и не смещаются. Наибольший эффект заклинивания разрушенных пород наблюдается при

угле между упрочненными полосами равном $\alpha = 36-54^\circ$. Величина смещений пород за период поддержания выработки в зоне влияния нарушения уменьшается в 1,5–1,9 раза.

Таблица 2

Изменение конвергенции пород в зоне влияния нарушения

Условия поддержания выработки	Средняя величина конвергенции пород, см	
	кровли с почвой	боков выработки
В массиве	105	49
В массиве в зоне опорного давления	127	54
В зоне интенсивного смещения пород	161	83
В зоне установившегося горного давления	81	40
Присечная выработка до зоны опорного давления	64	30
Присечная выработка в зоне опорного давления	107	42

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Исследования, выполненные в ИФГП НАН Украины, позволили установить закономерности изменения длины зависающей породной консоли, протяженности зоны временного опорного давления и зоны интенсивного смещения пород от скорости подвигания лавы и комплекса горно-геологических факторов;
2. Установлены закономерности формирования разгруженной зоны и зоны неупругих деформаций, которые являются одними из основных влияющих на смещения пород факторами;
3. Доказано, что протяженность зоны влияния мелкоамплитудного дизъюнктивного нарушения зависит от амплитуды смещения пласта и угла, под которым выработка пересекает плоскость сместителя нарушения;
4. Используя предложенные закономерности можно заранее прогнозировать величину смещений пород в выемочных выработках и выбрать наиболее рациональную технологию ведения горных работ;
5. Создание упрочненных полос, разбивающих разрушенные породы на клинья, позволяет уменьшить величину смещений пород в зоне влияния нарушения в 1,5–1,9 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровский Н.М. Проектирование комплексных выработок подземных сооружений. – М.: Недра. – 1970. – 320 с.
2. Касьян М.М. Геомеханічні основи управління зоною зруйнування порід навколо виробок для забезпечення їх стійкості на великих глибинах: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.15.02 ДонНТУ. – Донецьк: 2002. – 35 с.
3. Кольчик Е.И. Определение параметров зоны влияния очистной выемки при больших скоростях подвигания лав // Известия Донецкого горного института. – 2007. – № 2. – С. 17–21.

4. Кольчик Е.И. Изменение протяженности зоны опорного давления / Геологии и управления производством XXI века. – Донецк: ДонНТУ. – 2007. – С. 8–13.
5. Кольчик Е.И. Формирование зоны неупругих деформаций вблизи горных выработок/ Проблеми гірського тиску. – Донецьк: 2007. – № 15. – С. 5–18.
6. Куклин В.Ю. Задачи геомеханики охраны выработок в условиях интенсивной отработки угольных пластов // геомеханическая механика. – Днепропетровск: ИГТМ. – 2000. – № 23. – С. 54–57.
7. Черняк И.Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок. – М.: Недра., 1993. – 256 с.
8. Дружко Е.Б. О взаимодействии системы «крепь – массив» с учетом образования зоны неупругих деформаций // Проектирование и строительство угольных предприятий. 1968, № 9. – С. 19–22.
9. Нагда Ю.А., Солодовская В.Г. Неупругие деформации и разрушение горных пород // Деформирование и разрушение горных пород. – Бишкек: Илим, 1990. – С. 253–257.
10. Кольчик Е.И. Конвергенция пород в выемочных выработках при больших скоростях подвигания лав // Уголь Украины. – 2007. - № 7. – С. 11–12.
11. Кольчик Е.И. Влияние скорости подвигания лавы на конвергенцию пород в штреке // Геотехнологии и управление производством XXI века. – Донецк: ДонНТУ. – 2006. – Том I. – С. 11–15.
12. Кольчик Е.И., Кольчик И.Е. Исследование влияния геологических нарушений на устойчивость выработок // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ООО «Алекс». – 2002. – Вып. 5. – С. 61–64.
13. Кольчик Е.И. Влияние мелкоамплитудной дизъюнктивной нарушенности на устойчивость выработок // Физикол-технические проблемы горного производства. – Донецк: ИФГП НАНУ. – 2006. – Вып. 9. – С. 202–210.
14. Кольчик Е.И. Определение протяженности зоны влияния геологических нарушений // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. – 2007. – Вып. 68. – С. 50–55.
15. Кольчик Е.И., Кольчик И.Е., Болбат В.А. Управление устойчивости пород в зонах дизъюнктивных нарушений / Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ИФГП НАНУ. – 2007. – Вып. 10. – С. 112–118.